

Original Article

부산 연안 소파블록(테트라포드)의 한계 파고 추정

윤한삼¹ · 김해림² · 유현욱³ · 김민수^{4,†}

¹부경대학교 생태공학과 교수

²부경대학교 해양산업공학(협) 대학원생

³부경대학교 해양공학과 학생

⁴부경대학교 해양산업개발연구소 연구원

Estimation of Limiting Wave Height for Wave Dissipation Block (Tetrapod) in Busan Coast

Han-Sam Yoon¹, Hae-lim Kim², Hyun-Wook Yu³, and Min-Su Kim^{4,†}

¹Professor, Department of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan 48515, Korea

²Graduate Student, Interdisciplinary Program of Ocean Industrial Engineering, Pukyong National University, Busan 48515, Korea

³Student, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan 48515, Korea

⁴Researcher, Reasearch Center for Ocean Industrial Development, Pukyong National University, Busan 48515, Korea

요 약

본 연구는 부산 연안(기장~부산항~가덕도)의 기존 방파제 또는 호안에 시설된 소파블록(테트라포드)에 대한 현장조사를 수행하였다. 현장조사 결과를 바탕으로 Hudson 공식을 이용하여 구조물 건설 당시의 중량과 한계 파고를 추정하고자 하였다. 소파블록 중량이 가장 큰 지점은 대변항 방파제로서 40 ton이었으며, 쇄파 조건에서의 한계 파고는 6.25 m이었다. 방파제 체두부의 쇄파 조건 한계 파고를 살펴보면, 기장 연안(I구역)이 4.40 m, 해운대 및 부산항 주변 연안(II구역)이 4.73 m, 낙동강 하구역 및 가덕도 연안(III구역)이 3.31 m이었다. 현장조사 영역에서의 체두부 쇄파 조건의 전체 평균 한계 파고는 4.23 m로 조사되었다.

Abstract – This study carried out field survey for the wave dissipation block (Tetrapod) installed in existing breakwater or revetment of the coast in Busan region (Gijang~Busan port~Gadukdo). Based on the field survey results, the Hudson formula was used to estimate the weight and limiting wave height at the time of construction. The summary of this study is as follows. The largest points of tetrapod weight were Daebyeon port with 40 tons and the limiting wave height under breaking conditions was 6.25 m. The limiting wave height under breaking conditions (where head of breakwater) was found to be 4.40 m in the Gijang coast (Zone I), 4.73 m in the Haeundae and Busan Port coast (Zone II), and 3.31 m in the Nakdong Estuary and Gadukdo coast (Zone III). The overall average value of limiting wave height under the wave breaking conditions at the field survey area was found to be 4.23 m.

Keywords: Tetrapod weight(테트라포드 중량), Field survey(현장조사), Hudson formula(허드슨 공식), Limiting wave height(한계 파고)

1. 서 론

지구온난화에 따른 해수면 상승과 태풍의 대형화 등으로 해양 그리고 항만에 설치된 구조물에 적용된 설계 외력의 변동성이 커지고 있으며, 항만구조물의 설계·유지 관리 그리고 장기적인 이용성 확보 등에 있어서 불확정 요소가 점점 커지고 있다(Hong[2015];

Hong *et al.*[2018]). 그 중 Fig. 1과 같이 항만이나 어항의 외곽 시설로 건설되는 방파제는 그 어떤 구조물보다 오랜 기간 유지 및 운용되는 구조물로서 장기간의 변동성 속에서도 그 고유 기능이 정지되지 않고 유지되어야 한다. 이러한 방파제는 항의 최 외곽에서 파랑을 막는 구조물으로써 항만 건설 시 가장 먼저 시공되며, 항내 정온도 확보 및 시설물을 보호하는 역할을 수행한다. 또한 시공 과정에서 변수를 가장 많이 가지는 구조물이며, 아울러 공사 비용과 시간이 가장 많이 소요된다(MOF[2014]; Hong *et al.*[2018]).

[†]Corresponding author: kimmins@pukyong.ac.kr

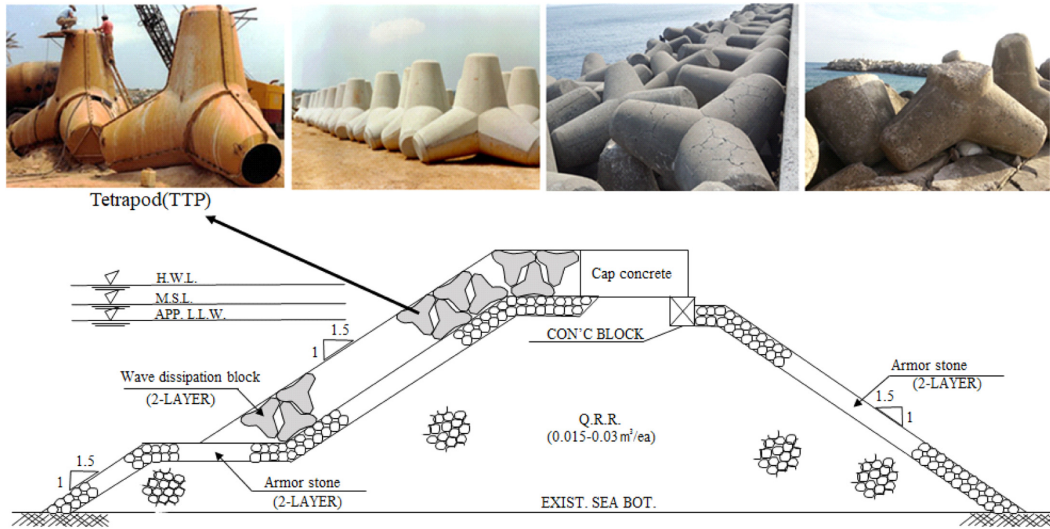


Fig. 1. Typical cross section of rubble mound breakwater (bottom) and failure of tetrapod, the wave dissipation block (top).

최근 방파제 설계에 적용되는 심해 설계과는 해양수산부의 2005년 심해 설계과 추산 자료(KORDI[2005])로, 과거 기준 심해 설계과 제원보다 상향되었다. 이는 기존 현장에 시공된 방파제 소파블록 중량의 상대적 하향 평가를 초래하며(Hong et al.[2018]), 이로 인해 현재 및 미래 시점에서 고파랑 및 해일 내습 시 기존 주변 항만 및 어항의 방파제에 소파블록으로 시설된 테트라포드(Tetrapod, TTP)의 경우 안전 하중 미흡으로 파괴 손실될 가능성이 높아진다.

일반적으로 경사식 방파제의 대표적인 파괴(피해)로는 Fig. 2에 제시된 바와 같다. 먼저 1차적인 피해로 사면 전면 소상대에서의 피복석의 파괴(Erosion, breakage of armour), 구조물 상부에 작용하는 파압 및 상치콘크리트 하부의 유실로 발생하는 상치콘크리트의 파괴(Breakage, Sliding, tilting of capping wall)가 있으며, 2차적인 피해로 월파에 의한 배후면 피복석의 파괴(Erosion of landside armour) 그리고 지반 및 체체의 침하에 의한 구조물의 파괴 등이 있다. 위 파괴 유형 중, 입사파고 증가로 인한 피복재 중량 부족 또는 설계과의 과소평가에 의한 피복재의 이동 및 탈락이 대표적이다(Kim[2020]).

우리나라 동해·남해·서해의 주요 항만 및 어항의 설계과고를 조

사한 Hong et al.[2018]의 연구에 따르면 설계과고의 평균 증가는 23년 동안 73% 증가했으며, 최근 지속적으로 상향 적용되고 있을 뿐만 아니라 부산항으로부터 남해안을 중심으로 급격히 증가하고 있음을 제시한 바 있다. 증가하는 설계외력과 함께 매년 태풍으로 인해 소파블록의 이탈이 발생하고 방파제가 파괴되는 피해가 발생하고 있으며, 이에 대한 대책이 요구되고 있다.

하지만 기존 우리나라 항만 및 어항의 외곽 시설물인 방파제에 적용된 소파블록에 대한 설계 하중 DB(Data Base)가 부재하고 그 설계보고서를 찾기도 어려운 상황이며, 지속적으로 증대되는 설계과고에 대해서 기존 소파블록의 중량이 얼마나 불안정성을 가지는지도 알 수 없다. 그러므로 현재 기존 연안 시설물(방파제 또는 호안)이 어떤 형식으로 건설되었는지 그리고 장래 해양성 외부 요인에 시설물의 안정성을 담보할 수 있는지에 대한 검토가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 부산 연안(기장~부산항~가덕도)의 기존 방파제 또는 호안에 시설된 소파블록(테트라포드)에 대한 현장조사를 수행하고 이를 바탕으로 현재 시설되어 있는 소파블록의 중량 및 불안정성(한계)을 가질 때의 파괴, 즉 한계과고를 추정하고자 하였다.

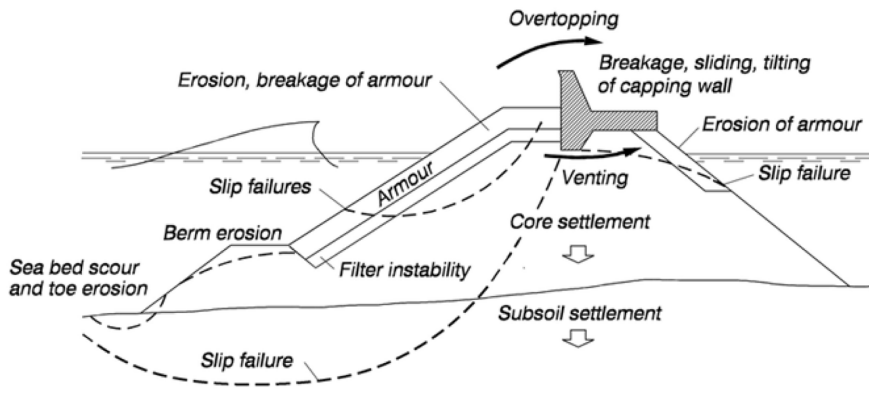


Fig. 2. Failure mode of a rubble mound breakwater (CIRIA[2007]).

2. 재료 및 방법

2.1 부산 연안 테트라포드 현장 선정

본 연구에서는 부산 연안(기장~부산항~가덕도) 소규모 어항의 방파제 또는 호안에 시설된 소파블록(테트라포드, Tetrapod/T.T.P)에 대해 현장조사를 실시하였다.

Fig. 3(A)는 본 연구대상인 부산 연안의 방파제 또는 호안 구조물의 총 34개 조사 정점의 공간 분포를 나타내었다. 연구 조사 영역은 전체 해역을 3개의 해역으로 구분하여 자연해안에 분포하는 I 구역(11개 지점), 도시 및 항만이 위치하는 II 구역(9개 지점), 도심 대하천 및 기타 부산항계 외부에 위치하는 III 구역(5개 지점)으로 구분하여 해석하고자 하였다. 현장 조사는 2019년 05월 11일부터 25일까지 수행하였으며 군사시설 및 외부인 출입금지 구역에 위치하는 경우이거나 테트라포드 피복재가 없는 연안 시설물은 조사에서 제외하였다.

일반적으로 방파제 설계 시 방파제 배후 시설의 중요도, 이용목적, 부두시설 유무, 입사파 진행 방향 등의 다양한 조건에 따라 제간부 내측/외측, 제두부의 케이슨(제체)의 높이 그리고 피복석(테트라포드)의 중량을 다르게 설계한다.

따라서 본 연구에서는 방파제의 경우 Fig. 3(B)에서와 같이 육지

에서 방파제의 첫번째 굴절이 있는 부분까지 직선 구간(c)을 제간부 내측(Inside), 두번째 굴절 지점까지 직선 구간(b)을 제간부 외측(Outside), (b)의 제간부를 제외한 바다쪽 단부(a)를 제두부(Head of breakwater)로 구간별 구분하여 조사하였다. 현장조사 시 제간부의 내측/외측과 제두부의 테트라포드의 중량을 모두 측정하였다. 또한 본 연구에서는 현장조사를 통해 테트라포드의 형태 치수 및 시설배치(정적 또는 난적 여부), 방파제 시설 방향(주 파향과의 상관성 비교 자료)등을 측정하고 기록하였다.

2.2 테트라포드 중량 측정

한국항만협회(Korea Ports & Harbours Association[1985])의 시공 메뉴얼에 해당하는 「Tetrapod 설계 및 시공」은 일반적인 테트라포드의 형태와 치수를 상세히 제시하고 있다. Fig. 4는 방파제 또는 호안 공사에 사용되는 테트라포드의 치수를 나타낸 그림이며 특별한 조건이 있는 경우를 제외하고는 이 형태를 따른다. Table 1은 Fig. 4에 상응하는 각 규격에 따른 테트라포드의 실제 중량, 체적, 거푸집 크기를 나타내고 있다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 4와 Table 1을 이용하여 주어진 테트라포드의 수치 중 측정하기에 용이한 D3 길이를 실측하여 각 방파제 또는 호안에 시설된 테트라포드의 중량을 추정하고자 하였다.

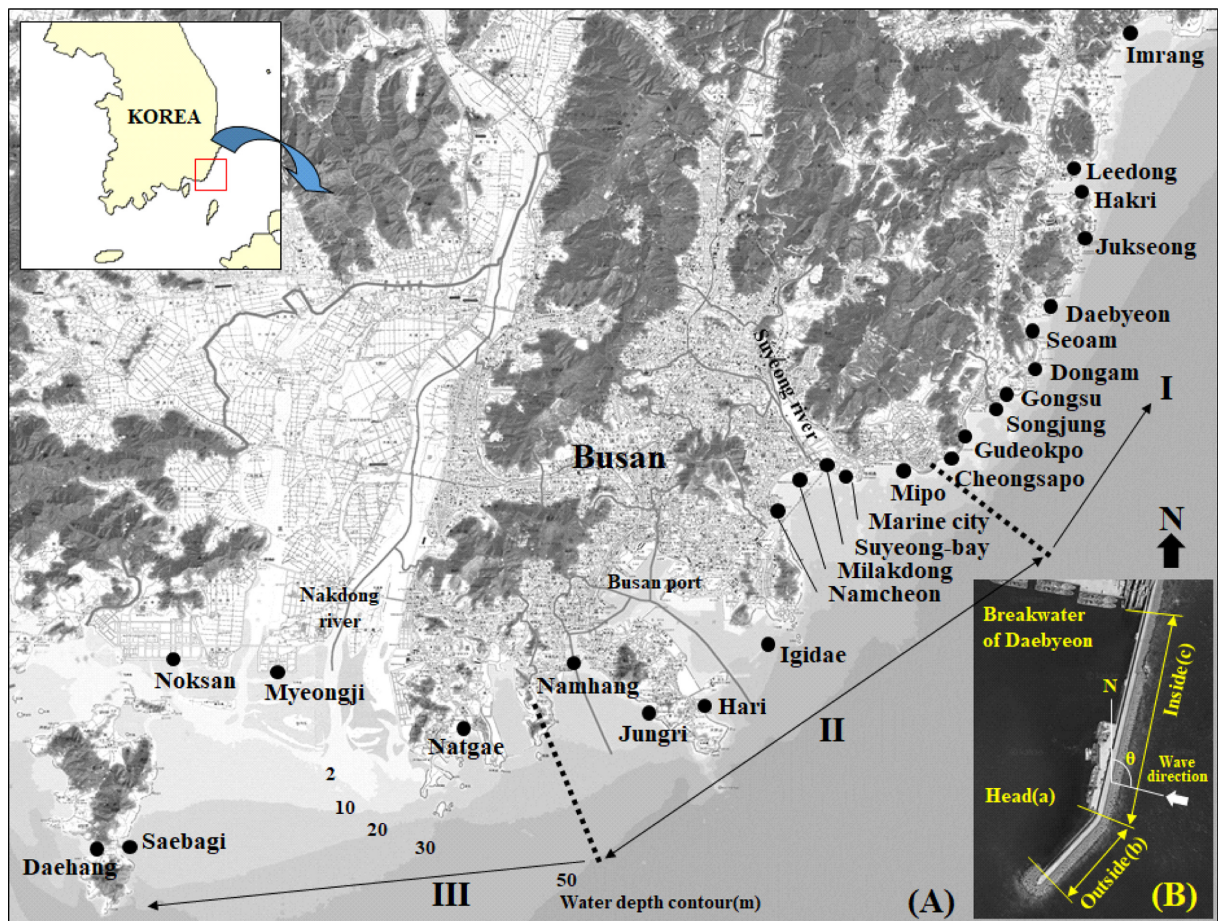


Fig. 3. Location of breakwater and revetment in this study area.

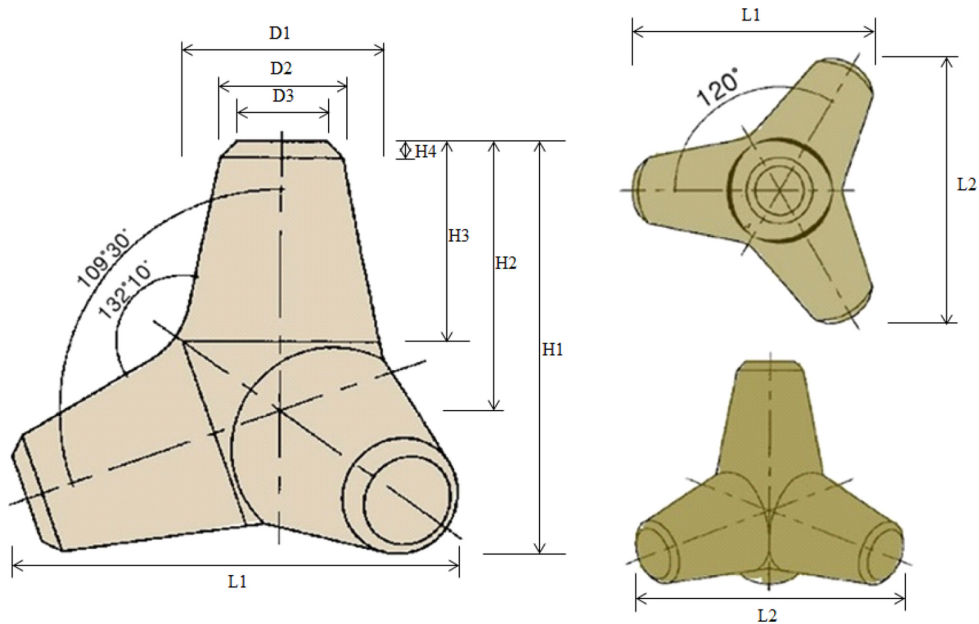


Fig. 4. Dimensions and specifications of tetrapod (KPHA, 1985).

Table 1. Weight list for characteristic values of tetrapod (KPHA, 1985)

Unit weight (ton)	Real unit weight (ton)	Volume (m ³)	Formwork volume (m ³)	Symbol(cm)								
				D1	D2	D3	H1	H2	H3	H4	L1	L2
0.5	0.46	0.20	2.18	430	270	200	900	585	435	35	965	1075
1.0	0.92	0.40	3.44	540	340	250	1130	740	545	45	1215	1350
2.0	1.84	0.80	5.42	680	420	310	1420	930	685	55	1525	1695
3.2	2.88	1.25	7.32	790	490	380	1650	1075	800	65	1770	1970
4.0	3.68	1.60	8.62	850	530	390	1790	1170	865	70	1920	2140
5.0	4.60	2.00	10.00	920	570	420	1930	1260	935	75	2075	2305
6.3	5.75	2.50	11.52	990	620	450	2070	1360	1010	80	2225	2470
8.0	7.36	3.20	13.74	1080	670	490	2260	1475	1095	90	2430	2700
10.0	9.20	4.00	15.88	1160	720	530	2430	1590	1175	95	2610	2905
12.5	11.50	5.00	18.46	1250	780	570	2620	1710	1270	105	2815	3130
16.0	14.49	6.30	21.54	1350	840	620	2830	1850	1370	110	3040	3380
20.0	18.40	8.00	25.19	1460	910	670	3060	2000	1485	120	3290	3655
25.0	23.0	10.00	29.29	1570	980	720	3300	2155	1600	130	3545	3945
32.0	28.75	12.50	33.90	1690	1060	780	3550	2320	1720	140	3815	4240
40.0	36.80	16.00	40.08	1840	1150	840	3860	2520	1870	155	4150	4610
50.0	46.0	20.00	46.44	1980	1240	910	4155	2715	2015	165	4465	4965
64.0	58.88	25.60	54.59	2150	1350	990	4505	2950	2185	180	4645	5385
72.0	66.70	29.00	59.37	2240	1400	1030	5240	3070	2280	185	5025	5615

Fig. 5는 현장에서 줄자를 이용하여 소파블록인 테트라포드의 크기 (D3)를 측정하는 장면을 보여주고 있다.

2.3 한계 파괴 역산

일반적으로 방파제 및 호안의 소파블록(테트라포드)은 기본적으로 설계파, 설계조위, 해저 토질 등을 고려하여 제작되며, 그 중량을 산정하는 방식으로는 우리나라의 항만 및 어항 설계기준·해설(MOF[2014])에 Hudson 식 (Hudson[1959]) 및 van der Meer 식 (van der Meer[1987])이 제시되어 있다. 하지만 우리나라는 과거부

터 아래 식 (1)과 같은 Hudson 식을 소요 중량산정에 사용해 왔다.

$$W = \frac{\gamma_r H^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \alpha} \rightarrow H = \sqrt[3]{\frac{K_D W (S_r - 1)^3 \cot \alpha}{\gamma_r}} \quad (1)$$

위 식 (1)에서 W는 피복재 중량, γ_r 는 피복재 비중, S_r 은 피복재의 해수에 대한 상대 비중, K_D 는 안정계수, H는 설계파고, α 는 비탈면과 해수면과의 각도이며, 소파블록의 경우 1.3~1.5를 사용한다 (MOF[2014]).



Fig. 5. Scene measuring D3 size of the wave dissipation block.

Shore Protection Manual(USACE[1984])의 개정판인 Coastal Engineering Manual(USACE[2005])에는 Hudson 식을 근간으로 Tetrapod의 경우에 사면 경사 1:1.5인 경사제에 대해 제간부 구간의 중량산정을 위해 쇄파와 비쇄파 조건에서 각각 $K_D = 7$ 과 $K_D = 8$ 을 제시하고 있으며, 제두부 구간에는 $K_D = 5$ 와 $K_D = 6$ 을 제시하였다(Kim and Lee[2017]).

실제 구조물 시공에 있어서, 현장 여건이나 공사비 등의 이유로 안전율을 고려하여 소요 중량 산정 값보다 큰 소파블록을 사용하기도 하므로 식 (1)을 통해 설계 파고를 역으로 정확히 추정하기에는 무리가 있으나, 현재 시설되어 있는 소파블록의 불안정 한계 파고(Limiting wave height)를 추정해낼 수는 있다. 한계 파고란 일정 수심에서 쇄파가 발생하기 시작하는 파고의 의미를 가지나, 본 연구에서는 소파블록이 불안정함(한계)을 가지는 파고의 크기의 의미로 사용하고자 한다.

따라서 본 연구에서는 피복재의 중량(관측값) 및 사면경사 α , 각종 설계된 계수(K_D) 값을 가정한 Hudson 식을 적용하여 한계 파고를 산정하였다. 여기서, 사면경사는 MOF[2014]와 USACE[2005]의 문헌을 통해 결정하였으며, 34개의 모든 정점에 대해 $\alpha=1.5$ 의 값을 적용하였고 그에 따른 K_D 값을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 테트라포드 현장조사 결과

현장 조사를 통해 부산 연안에 위치한 총 34개 조사 정점의 방파제 또는 호안에 시설된 테트라포드의 현황을 조사하였다. Table 2는 각 조사 정점의 위치, 방파제 또는 호안의 종류, 시설물의 설치 방향, 피복석의 정적 또는 난적의 상태, 테트라포드의 D3 측정값을 정리한 결과이다. 아울러 D3 값을 이용하여 산정된 중량 값을 위 식(1)의 Hudson 식에 대입하여 비쇄파조건(non-breaking condition)과 쇄파조건(breaking condition)에 따라 나누어 한계 파고를 산출하여 정리하였다.

상술한 총 34개의 조사 정점 중에서 방파제인 경우는 24개소, 호안은 10개소이며 피복석이 정적(uniform)인 경우는 12개소, 난적(random)인 경우는 22개소에 해당하였다. 또한 시설물의 설치 방향(구조물의 설계파 입사 파향)은 다소 차이가 있으나 대체적으로 SW~E계열이었다.

3.2 테트라포드 중량의 공간 분포

현장 조사를 통해 얻은 부산 연안의 방파제 또는 호안의 테트라포드의 중량을 분석한 결과를 그림으로 제시하면 Fig. 6과 같다.

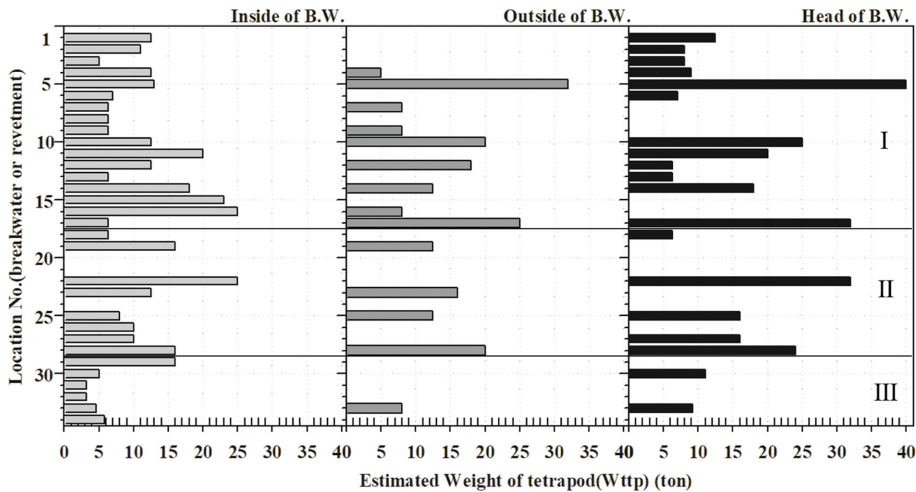


Fig. 6. Comparison of wave dissipation block (TTP) weights of small fishing ports and revetment in Busan coast.

Table 2. Estimation of the weight and limiting wave height of the tetrapod D3 size in the study area

Region	No.	Location	Type	Direction (deg.)	Form	D_3 (mm)		W_{TP} (ton)			H_{NB} (m)			H_B (m)			
						Main body		Head	Main body		Head	Main body		Head	Main body		Head
						Inside	Outside	of B.W.	Inside	Outside	of B.W.	Inside	Outside	of B.W.	Inside	Outside	of B.W.
I	1	Imrang	Breakwater	SE137°	Random	570	-	570	12.5	-	12.5	4.96	-	4.51	4.75	-	4.24
	2	Leedong	Breakwater	E90°	Random	550	-	500	11	-	8	4.76	-	3.89	4.55	-	3.66
	3	Hakri	Breakwater	E80°	Random	420	-	490	5	-	8	3.66	-	3.89	3.50	-	3.66
	4	Jukseong	Breakwater	E80°	Random	570	420	500	12.5	5	9	4.96	3.66	4.04	4.75	3.50	3.80
	5	Daebyeon	Breakwater	E111°	Uniform	470, 580	780	840	13	32	40	5.03	6.79	6.64	4.81	6.49	6.25
	6	Seoam1	Breakwater	E112°	Random	450	-	450	7	-	7	4.09	-	3.72	3.91	-	3.50
	7	Seoam	Revetment	-	Random	450	490	-	6.3	8	-	3.95	4.28	-	3.78	4.09	-
	8	Seoam2	Breakwater	SW210°	Random	450	-	-	6.3	-	-	3.95	-	-	3.78	-	-
	9	Dongam	Revetment	-	Random	450	470	-	6.3	8	-	3.95	4.28	-	3.78	4.09	-
	10	Dongam	Breakwater	SE122°	Random	570	680	700	12.5	20	25	4.96	5.80	5.68	4.75	5.55	5.35
	11	Gongsu	Breakwater	E65°	Random	670	-	670	20	-	20	5.80	-	5.27	5.55	-	4.96
	12	Songjung	Breakwater	N105°	Uniform	570	640	450	12.5	18	6.3	4.96	5.60	3.59	4.75	5.36	3.38
	13	Gudeokpo1	Breakwater	-	Uniform	450	-	450	6.3	-	6.3	3.95	-	3.59	3.78	-	3.38
	14	Gudeokpo2	Breakwater	N190°	Random	640	580	640	18	12.5	18	5.60	4.96	5.09	5.36	4.75	4.79
	15	Cheongsapo	Revetment1	E95°	Uniform	700	-	-	23	-	-	6.08	-	-	5.82	-	-
	16	Cheongsapo	Revetment2	W166°	Uniform	720	490	-	25	8	-	6.25	4.28	-	5.98	4.09	-
	17	Cheongsapo	Breakwater	W253°	Uniform	450	720	780	6.3	25	32	3.95	6.25	6.17	3.78	5.98	5.80
Average						542.50	585.56	586.67	11.97	15.17	16.01	4.76	5.10	4.67	4.55	4.88	4.40
II	18	Mipo	Breakwater	-	Uniform	450	-	450	6.3	-	6.3	3.95	-	3.59	3.78	-	3.38
	19	Marine city	Revetment	-	Random	610	570	-	16	12.5	-	5.39	4.96	-	5.15	4.75	-
	20	Suyeong-Bay	Breakwater	-	Random	620	-	-	16	-	-	5.39	-	-	5.15	-	-
	21	Millakdong	Revetment	SW220°	Random	550	-	-	10	-	-	4.61	-	-	4.41	-	-
	22	Millakdong	Breakwater	W178°	Random	720	-	780	25	-	32	6.25	-	6.17	5.98	-	5.80
	23	Namcheon	Breakwater	-	Random	570	620	-	12.5	16	-	4.96	5.39	-	4.75	5.15	-
	24	Igidae	Breakwater	E80°	Uniform	420~390	-	-	5	-	-	3.66	-	-	3.50	-	-
	25	Hari	Breakwater	-	Random	480	570	620	8	12.5	16	4.28	4.96	4.90	4.09	4.75	4.61
	26	Jungril	Revetment	-	Uniform	530	-	-	10	-	-	4.61	-	-	4.41	-	-
	27	Jungril2	Breakwater	-	Uniform	530	-	620	10	-	16	4.61	-	4.90	4.41	-	4.61
	28	Namhang	Breakwater	-	Random	620	680	700	16	20	24	5.39	5.80	5.60	5.15	5.55	5.27
Average						568.00	610.00	634.00	12.25	15.25	18.86	4.83	5.28	5.03	4.62	5.05	4.73
III	29	Natgae1	Revetment	-	Random	620	-	-	16	-	-	5.39	-	-	5.15	-	-
	30	Natgae2	Breakwater	E70°	Random	420	-	540	5	-	11	3.66	-	4.32	3.50	-	4.07
	31	Myeongji	Revetment	S185°	Uniform	360	-	-	3.2	-	-	3.15	-	2.86	3.01	-	2.69
	32	Noksan	Revetment	S177.23°	Uniform	360	-	-	3.2	-	-	3.15	-	2.86	3.01	-	2.69
	33	Saebagi	Breakwater	SE103.47°	Random	360, 420	420, 490	530	4.6	4.6, 8	9.2	3.56	4.28	4.07	3.4	4.09	3.83
	34	Daehang	Breakwater	NW276.14°	Random	450	-	-	5.75	-	-	3.83	-	3.48	3.66	-	3.28
Average						442.00	420, 490	535.00	6.29	4.6, 8	10.10	3.79	4.28	3.52	3.62	4.09	3.31
Total average						534.52	593.08	593.68	11.06	15.19	16.14	4.61	5.09	4.49	4.41	4.87	4.23

※ H_{NB} and H_B : Estimated wave height under non-breaking and breaking wave conditions, W_{TP} : Estimated weight of TTP, D_3 : Measured value of tetrapod D3 part

일반적인 사항이지만 제두부의 테트라포드 중량이 제간부에 비해 큰 값을 나타냈으며, 중량이 가장 큰 정점은 대변항 방파제(No.5)로 40 ton이었다. 다음으로 청사포 방파제(No.17) 32 ton, 민락동 어항 방파제(No.22) 32 ton, 동암항 방파제(No.10) 25 ton 순이었으며, 가장 작은 정점은 명지(No.31)와 녹산(No.32) 호안으로 3.2 ton이었다. 기장 연안(I구역)의 테트라포드 제두부 평균 중량은 16.01 ton, 해운대 및 부산항 주변 연안(II구역)은 18.86 ton, 낙동강 하구역 및 가덕도 연안(III구역)은 10.1 ton이었으며 전체 평균은 16.14 ton으로 조사되었다.

조사 지역별로 살펴보면 기장 연안(I구역)의 방파제에서는 제간부 내측의 테트라포드 중량이 제간부 외측의 테트라포드 중량보다 큰 지역이 다수 관측되었다. 부산 기장 연안은 어업이 주로 행해지는 소규모 어항 지역으로서 어선이 정박하고 있는 경우가 많고, 어선은 대체로 항 입구부로부터 먼 제간부 내측에 계류한다. 이는 월파가 발생할 때의 피해를 예측했을 때 제간부 내측의 피해가 더 크다고 예상하여 소파블록의 중량을 크게 설계한 결과로 해석할 수 있다.

해운대 및 남구 연안(II구역)의 테트라포드는 다른 지역의 경우보다 월등히 큰 중량을 보이는데 이는 방파제 및 호안 배후가 주거 시설과 맞닿아 있는 지리적 조건에 의한 결과로 보인다. 부산항 주변(II구역)의 테트라포드 중량은 항만시설과 관련이 없는 경우 작게 나타났으며, 항만과 밀접한 관계를 가지는 경우 중량이 크게 나타났다. 이는 항만을 보호하고 항내 정온도를 향상시키기 위한 목적을 확인할 수 있다. 이에 반해 낙동강 하구역 및 가덕도 연안(III구역)에 시설된 테트라포드는 다른 지역의 경우보다 월등히 작은 중량을 보였다.

일반적으로 제두부를 제간부 중량의 1.5배로 설계하는 지침이 있지만, 조사한 자료에 따르면 부산 연안에 위치한 방파제의 20%만이 조건을 만족하고 있었으며 나머지 80%의 방파제는 두 구간이 동일하거나 오히려 반대의 결과를 나타냈다.

3.3 구간별 테트라포드 중량 분석

현장 조사를 통해 획득한 방파제의 제간부(내측/외측) 및 제두부의 테트라포드 중량을 나타내보면 다음과 같다.

방파제의 경우, 임랑(No.1), 서암(No.8), 이기대(No.24)에서 제간부와 제두부의 테트라포드 중량이 같음을 확인하였다. 세 지역 모두 큰 중량을 사용하지 않았으며 배후지가 항만이 아니기 때문에 허용 월파량이 높게 산정되었을 것으로 추측된다.

전반적으로 제간부 내측, 제간부 외측, 제두부 순으로 중량이 증가하는 경향을 보이며, 이동(No.2), 민락동(No.22), 남천동(No.23) 방파제의 경우 제간부 외측과 제두부의 중량이 같게 산정된 것을 확인할 수 있다. 다만, 예외적인 경우로 이동 방파제(No.2)와 죽성 방파제(No.4)에서는 제간부 내측의 중량이 제간부 외측과 제두부에 비해 높은 것으로 나타났다. 이는 앞서 언급한 이유로, 어선이 제간부 내측에 대부분 계류되어 있는 영향으로 판단된다.

방파제 인근에 위치한 호안에서의 테트라포드 중량은 일반적으

로 해당 방파제보다 조금 낮게 산정된 것으로 보이나, 낮개(No.29) 정점의 경우 호안에서 더 높은 중량의 테트라포드가 관측되었다. 이는 호안 배후에 학교 및 주택가를 포함한 주거지가 위치하고 있어, 배후지의 중요도를 높게 평가하여 허용 월파량을 낮게 산정했기 때문으로 추측된다. 마찬가지로 해운대 마린시티(No.19) 호안의 테트라포드 역시 해당 지역의 파고나 기후 조건, 배후지의 중요성을 고려하여 중량이 높게 산정된 것으로 추측된다.

또한 동일 지점의 방파제 및 호안에 시설된 테트라포드의 중량이 일정할 것으로 예측되었으나, 실제 현장 조사를 수행한 결과에서는 그렇지 않았다. 즉, 대부분 두 개 이상의 중량의 테트라포드가 혼용되어 시설되었으며, 상단부 또는 특정 구역에서 다른 중량의 테트라포드로 보강한 것으로 추측되는 곳이 관측되었다. 임랑 방파제, 서암 첫병 등대 부근, 청사포 방파제 근처의 호안, 수영만 매립지 호안, 민락동 방파제 근처의 호안, 이기대 방파제, 중리항 호안을 제외한 모든 조사 정점에서 중량이 다른 2가지 종류 이상의 테트라포드를 사용한 것이 확인되었다.

정적과 난적의 소파블록 시설 형태에 따른 특징을 분석한 결과, 방파제의 경우 정적 7 정점, 난적 17 정점, 호안의 경우 정적 5 정점, 난적 5 정점으로 시설되어 있는 것을 확인하였으며, 해안 구조물의 종류나 시설 위치에 따른 정적/난적의 규칙성은 발견하지 못했다.

정적과 난적의 시설 형태에 따른 테트라포드 중량 특징을 살펴보고자 두 시설 형태를 혼용한 구덕포 방파제를 적용하였다. 정적의 구덕포1(No.13) 정점의 경우 방파제 전체에 동일한 중량의 테트라포드로 시설되어 있었으며, 난적의 구덕포2(No.14) 정점의 경우, 제간부 내측과 제두부는 18 ton의 동일한 테트라포드가 시설되어 있으나, 제간부 외측에 12.5 ton의 테트라포드가 시설되어 있었다. 즉, 난적으로 시설된 구덕포2 정점의 제간부 내측이 외측보다 중량이 큰 테트라포드가 시설되어 있으며, 이는 보강한 것으로 추측할 수 있다. 따라서 보수, 보강 등의 추가 공사로 정적에서 난적으로 시설 형태가 변한 것으로 추측되며, 그 외 정적과 난적으로 인한 테트라포드 중량의 다른 특징은 발견하지 못했다.

3.4 부산 연안의 한계 파고 분포

현장 조사를 통해 얻은 부산 연안의 방파제 또는 호안의 테트라포드의 중량을 이용한 비쇄파 및 쇄파 조건에서의 한계 파고를 산정한 결과는 각각 Fig. 7 및 Fig. 8과 같다.

테트라포드 중량을 통해 역산출한 결과, 조사 정점별 비쇄파 조건에서의 한계 파고가 가장 큰 정점은 대변항 방파제(No.5)로 6.79 m였으며, 다음으로 청사포 호안(No.16) 6.25 m, 민락동 어항 방파제(No.22) 6.25 m, 공수항(No.11) 5.8 m 순이었다. 한계 파고가 가장 작은 정점은 명지(No.31)와 녹산(No.32) 호안으로 3.15 m이었다. 방파제 제간부 외측에서 평균 한계 파고가 가장 높게 나타났으며, 기장 연안(I구역)의 제간부 외측 한계 파고는 5.10 m, 해운대 및 부산항 주변 연안(II구역)은 5.28 m, 낙동강 하구역 및 가덕도 연안(III구역)은 4.28 m이었으며 전체 평균은 5.09 m로 조사되었다.

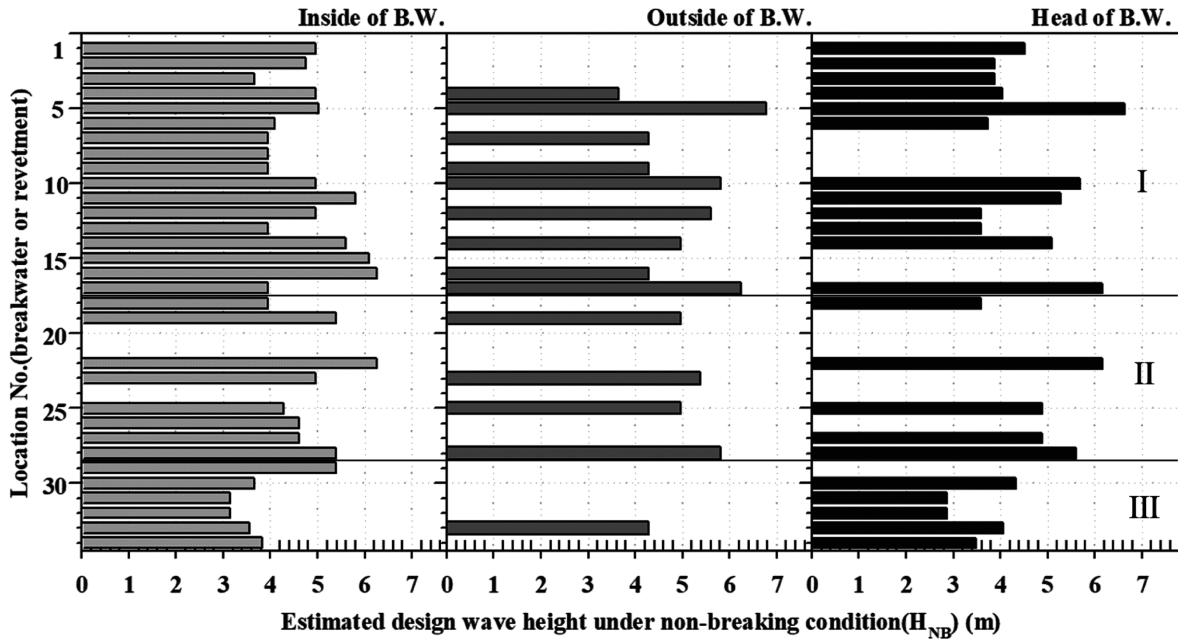


Fig. 7. Estimation of limiting wave height using wave dissipation block (TTP) weight under non-breaking condition.

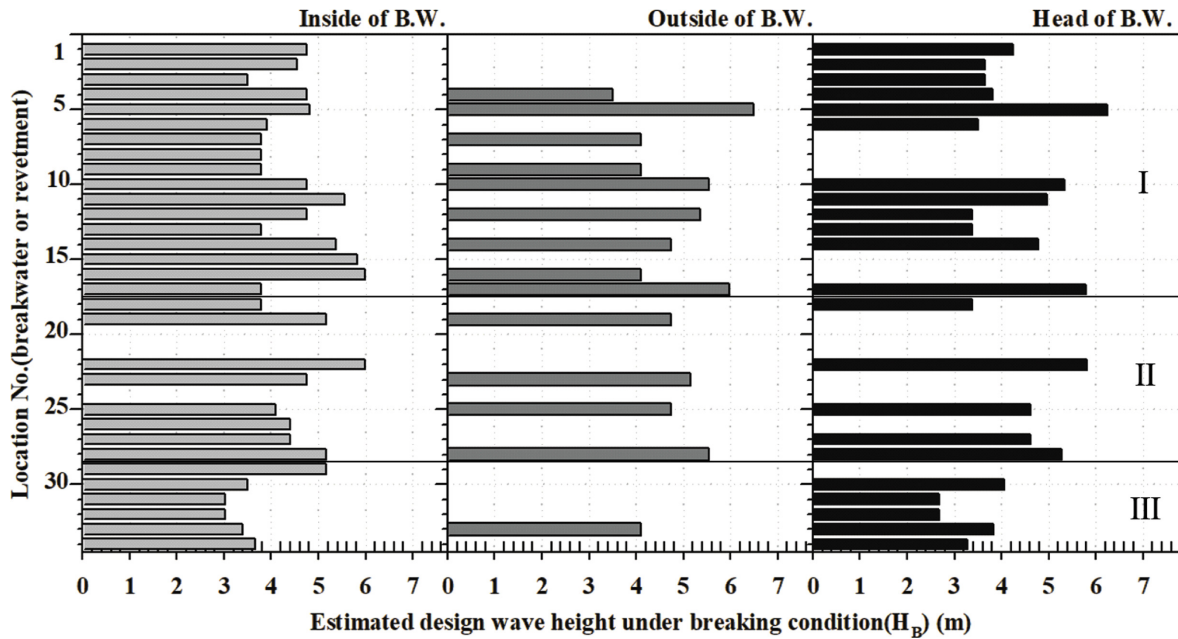


Fig. 8. Estimation of limiting wave height using wave dissipation block (TTP) weight under breaking condition.

또한 조사 정점별 쇄파 조건에서의 한계 파고가 가장 큰 정점은 대변항 방파제(No.5)로 6.49 m였으며, 다음으로 청사포 호안(No.16) 5.98 m, 민락동 어항 방파제(No.22) 5.98 m, 공수항(No.11) 5.55 m 순이었다. 한계 파고가 가장 작은 정점은 명지(No.31)와 녹산(No.32) 호안으로 3.01 m이었다. 방파제 제간부 외측에서 평균 한계 파고가 가장 높게 나타났으며, 기장 연안(I구역)의 제간부 외측 한계 파고는 4.88 m, 해운대 및 부산항 주변 연안(II구역)은 5.05 m, 낙동강 하구역 및 가덕도 연안(III구역)은 4.09 m이었으며 전체 평균은 4.87 m로 조사되었다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 부산 연안(기장~부산항~가덕도)의 기존 방파제 또는 호안에 시설된 소파블록(테트라포드)에 대한 현장조사를 수행하고 이를 바탕으로 현재 시설되어 있는 소파블록의 중량 및 불안정성(한계)을 가질 때의 파고, 즉 한계 파고를 추정하고자 하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 총 34개의 조사 정점 중에서 피복석이 정적(uniform)인 경우는 12개소, 난적(random)인 경우는 22개소에 해당하였으며, 시설물의

설치 방향(구조물의 설계파 입사 파향)은 다소 차이가 있으나 대체적으로 SW~E계열이었다.

(2) 소파블록 중량이 가장 큰 정점은 대변항 방파제로 40 ton이었으며 다음으로 청사포 방파제(32 ton)와 민락동 어항 방파제(32 ton), 동암항 방파제(25 ton) 순이었다. 기장 연안(I구역)의 제두부 평균 소파블록 중량은 16.01 ton, 해운대 및 부산항 주변 연안(II구역)은 18.86 ton, 낙동강 하구역 및 가덕도 연안(III구역)은 10.1 ton이었으며 전체 평균 소파블록 중량은 16.14 ton으로 조사되었다.

(3) 소파블록 중량을 통해 역산출한 조사 정점별 쇄파 조건에서의 한계 파고가 가장 큰 정점은 대변항 방파제로 6.49 m였으며, 다음으로 청사포 호안(5.98 m), 민락동 어항 방파제(5.98 m), 공수항(5.55 m) 순이었다. 방파제 제간부 외측에서 평균 한계 파고가 가장 높게 나타났으며, 기장 연안(I구역)의 제간부 외측 한계 파고는 4.88 m, 해운대 및 부산항 주변 연안(II구역)은 5.05 m, 낙동강 하구역 및 가덕도 연안(III구역)은 4.09 m이었으며 전체 평균은 4.87 m로 조사되었다.

이상과 같은 본 연구의 자료와 성과는 현장조사를 통한 분석 자료이므로 향후 기초 설계자료와의 비교, 해역 수심 및 사면경사 고려, 실제 해양 입사파랑과의 상호비교 등 추가 세부 연구 등을 통하여 더 구체적으로 진행되고 보완되어야 할 필요성이 있다. 또한 연안 시설물 설계 당시와 현재 설계파고의 비교, 시설물의 보완 여부 등이 검토된다면 향후 부산 연안 소파블록 시설물에 대한 Data base 구축이 가능하고 이는 향후 해양 외력 증대에 따른 방파제 및 호안 유지보수를 위한 기초자료로 활용 가능하리라 판단된다.

후 기

이 논문은 2019년도 해양수산기술지역특성화사업(영남씨그랜트 사업)의 연구비 지원을 받아 연구되었음(C-D-2019-0107).

References

- [1] CIRIA, CUR, CETMEF., 2007, The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition) C683, CIRIA, London.
- [2] Hong, K., 2015, A Study on the New Design Processes based on the Analysis of Conventional Korea Breakwaters, Ph.D. Pukyong National Univ., Busan, Korea.
- [3] Hong, K., Kang, Y.K., Kim, H.J., Yoon, H.S. and Ryu, C.R., 2018, Analysis of Change Process in the Design Conditions of Harbor Breakwaters in Korea, J. of Korean Soc. of Coast. and Ocean Eng., 30(3), 123-133.
- [4] Hudson, R.V., 1959, Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters, J. of Waterw. and Harb. Division, ASCE, 85(WW3), 93-121.
- [5] Kim, M.S., 2020, A Study on the Movement of Dissipation Block of Rubble Mound Breakwater due to Typhoon, M.S. thesis, Pukyong National Univ., Busan, Korea.
- [6] Kim, Y.T. and Lee, J.I., 2017, Hydraulic Experiments on Stable Armor Weight and Covering Range of Round Head of Rubble-Mound Breakwater Armored with Tetrapods: Non-breaking conditions, J. of Korean Soc. of Coast. and Ocean Eng., 29(6), 389-398.
- [7] Korea Ocean Research & Development Institute (KORDI), 2005, The report of estimation for deep-sea design wave in Korean coastal seas II (in Korean).
- [8] Korea Ports & Harbours Association., 1985, Tetrapod Design, Construction, 1-25.
- [9] Ministry of Oceans and Fisheries., 2014, Design standards for harbour and fishery port.
- [10] USACE., 1984, Shore Protection Manual. U.S. Army Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- [11] USACE., 2005, Coastal Engineering Manual. U.S. Army Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- [12] van der Meer, J.W., 1987, Stability of breakwater armor layers design formulae. Coastal Engineering, 11, 219-239.

Received 7 April 2020

1st Revised 18 May 2020, 2nd Revised 11 August 2020

Accepted 14 August 2020